

**PENGHASILAN SELULOSA FOSFAT DARIPADA TANDAN
BUAH KELAPA SAWIT KOSONG (OPEFB) DAN
PENGOPTIMUMAN PROSES DENGAN MENGGUNAKAN
KAEDAH SAMBUTAN PERMUKAAN (RSM)**

ROHAIZU ROSLAN

UNIVERSITI SAINS MALAYSIA

2011

**PENGHASILAN SELULOSA FOSFAT DARIPADA TANDAN
BUAH KELAPA SAWIT KOSONG (OPEFB) DAN
PENGOPTIMUMAN PROSES DENGAN MENGGUNAKAN
KAEDAH SAMBUTAN PERMUKAAN (RSM)**

Oleh

ROHAIZU ROSLAN

Tesis yang diserahkan adalah bagi memenuhi

keperluan bagi Ijazah Sarjana Sains

FEBRUARI 2011

PENGHARGAAN

Penulis ingin memanjatkan syukur ke hadrat illahi dengan rahmat dan limpah kurnianya projek penyelidikan ini dapat disiapkan dalam tempoh masa yang ditetapkan. Terima kasih tidak terhingga diucapkan kepada Prof Wan Rosli Wan Daud sebagai penyelia yang telah memberikan sepenuh perhatian dan tunjuk ajar sepanjang projek ini dijalankan. Idea yang bernas dan khidmat nasihat yang diberikan oleh beliau telah melancarkan lagi perjalanan projek yang dilakukan.

Penghargaan ini juga diberikan kepada pensyarah dan staf di Universiti Sains Malaysia umumnya dan Pusat Pengajian Teknologi Industri khususnya yang telah terlibat dan memberi bantuan secara langsung atau tidak langsung. Tidak lupa juga kepada pihak universiti yang telah memberikan bantuan kewangan dalam skim geran universiti 1001/PTEKIND/8140151 dan 1001/PTEKIND/831018.

Penghargaan ini juga ditujukan kepada keluarga tersayang yang sentiasa ada bersama untuk memberikan sokongan dan dorongan. Kepada rakan-rakan seperjuangan dengan kehadiran mereka telah menyemarakkan lagi semangat untuk meneruskan perjuangan dalam menyiapkan projek yang dijalankan. Terima kasih dengan kehadiran kalian.

SENARAI KANDUNGAN

PENGHARGAAN	ii
SENARAI KANDUNGAN	iii
SENARAI JADUAL	viii
SENARAI RAJAH	ix
SENARAI SINGKATAN	xiii
ABSTRAK	xiv
ABSTRACT	xvi
BAB SATU: PENGENALAN	1
1.1 Latar belakang projek	1
1.2 Objektif	5
BAB DUA: TINJAUAN LITERATUR	6
2.1. Kelapa sawit	6
2.1.1. Industri sawit di Malaysia	8
2.1.2. Krisis kelestarian alam sekitar daripada industri sawit	9
2.1.3. Biojisim sebagai sumber alternatif bagi bahan mentah	12
2.1.4. Aplikasi biojisim kelapa sawit hasilkan produk hiliran	15
2.2. Selulosa	17
2.2.1. Kimia selulosa	18
2.2.2. Selulosa mikrokristal (MCC)	21
2.2.3. Terbitan selulosa	23
2.2.4. Darjah penukargantian selulosa	28

2.3.	Selulosa dan terbitannya dalam aplikasi perubatan	30
2.4.	Selulosa fosfat sebagai biobahan	32
2.4.1.	Biobahan	33
2.4.2.	Pasaran biobahan	35
2.4.3.	Sifat selulosa fosfat	36
2.5.	Penghasilan selulosa fosfat daripada tandan buah kelapa sawit kosong (EFB)	39
2.5.1.	Proses fosforilasi	40
2.5.2.	Reka bentuk eksperimen	44
2.5.2.1.	Kaedah permukaan sambutan (RSM)	45
BAB TIGA: KAEDAH EKSPERIMEN		50
3.	Aliran keseluruhan	50
3.1.	Penyediaan stok suapan untuk proses fosforilasi	52
3.1.1.	Penghasilan pulpa terlarut (PT)	52
3.1.1.1.	Prahidrolisis	52
3.1.1.2.	Pemulpaan soda	53
3.1.1.3.	Pelunturan oksigen (O)	54
3.1.1.4.	Pelunturan ozon (Z)	54
3.1.1.5.	Pelunturan peroksida (P)	55
3.1.2.	Penghasilan selulosa mikrokristal (MCC)	56
3.1.3.	Ujian terhadap MCC dan PT	57
3.1.3.1.	Spektrofotometer inframerah transformasi fourier (FT-IR)	57
3.1.3.2.	Mikroskop pengimbas elektron (SEM)	57

3.1.3.3.	Analisis termogravimetri (TGA)	58
3.1.3.4.	Kalorimeter pengimbas perbezaan (DSC)	58
3.2.	Penghasilan selulosa fosfat (CP)	59
3.2.1.	Fosforilasi	59
3.2.2.	Analisis hasil fosforilasi	61
3.2.2.1.	Peratus hasil	61
3.2.2.2.	Pentitratan potentiometri	61
3.2.2.3.	Penentuan darjah penukargantian (DS)	62
3.2.2.3.1.	Penghadaman	62
3.2.2.3.1.1.	Penghadaman larutan piawai fosfat	63
3.2.2.3.2.	Penentuan kandungan fosforus	63
3.2.2.3.3.	Keluk tentukuran	65
3.2.2.4.	Spektroskopi resonans magnet nukleus (NMR)	65
3.2.2.5.	Mikroskop pengimbas elektron (SEM)	65
3.2.2.6.	Keupayaan pembengkakan	66
3.2.2.7.	Analisis termogravimetri (TGA)	66
3.2.2.8.	Kalorimeter pengimbas perbezaan (DSC)	66
3.3.	Penentuan keadaan optimum proses fosforilasi (kaedah RSM)	67
 BAB EMPAT: KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN		70
4.	Pengenalan	70
4.1.	Pengenalpastian stok suapan yang sesuai untuk fosforilasi	71
4.1.1.	Perbezaan PT-OPEFB dengan MCC-OPEFB	71
4.1.1.1.	Perbincangan	76

4.1.2.	Pengesahan hasil fosforilasi ke atas PT-OPEFB dan MCC- OPEFB melalui analisis FT-IR	77
4.1.2.1.	Perbincangan	80
4.1.3.	Ciri-ciri selulosa fosfat yang dihasilkan	81
4.1.3.1.	Perbincangan	91
4.2.	Proses pengoptimuman melalui kaedah permukaan sambutan (RSM)	95
4.2.1.	Analisis regresi	104
4.2.2.	Pemeriksaan kecukupan model	108
4.2.2.1.	Anggapan kenormalan	108
4.2.2.2.	Cerapan adalah satu pembolehubah rawak	110
4.3.	Analisis kesan pembolehubah tak bersandar terhadap proses fosforilasi	112
4.3.1.	Kesan terhadap kandungan fosforus	113
4.3.2.	Kesan terhadap jumlah hasil	119
4.3.3.	Kesan terhadap serapan air	125
4.3.4.	Kesan terhadap takat lebur	129
4.3.5.	Keputusan daripada rekabentuk ujikaji	133
4.4.	Pengoptimuman proses fosforilasi	139
 BAB LIMA: KESIMPULAN DAN CADANGAN		142
5.1.	Kesimpulan daripada keputusan eksperimen	142
5.2.	Cadangan penyelidikan masa hadapan	144

RUJUKAN	146
LAMPIRAN 1	158
LAMPIRAN 2	162
LAMPIRAN 3	166
TERBITAN	175

SENARAI JADUAL

Jadual 2.1:	Eksport produk sawit tahunan: 2004 – 2008 (Tan)	9
Jadual 2.2:	Biojisim yang diperoleh daripada pelbagai sumber	14
Jadual 2.3:	Komposisi kimia buah kelapa sawit kosong (EFB)	16
Jadual 2.4:	Berat molekul dan darjah pempolimeran bagi selulosa berdasarkan sumber	19
Jadual 2.5:	Biobahan sebagai polimer, logam, seramik dan komposit.	34
Jadual 3.1:	Kombinasi aras-aras pembolehubah tidak bersandar untuk peringkat penskrinan	68
Jadual 4.1:	Lima aras bagi pembolehubah tak bersandar bagi proses fosforilasi	96
Jadual 4.2:	Nilai pembolehubah terkod dan nilai sebenar dan sambutan yang sepadan bagi proses fosforilasi	97
Jadual 4.3:	Statistik bagi model linear dan kuadratik	102
Jadual 4.4:	Analisis varians permukaan sambutan untuk model kuadratik bagi kandungan fosforus (P), jumlah hasil (Y), nilai serapan (S) dan takat lebur (T_m) selulosa fosfat.	106
Jadual 4.5:	Julat yang perlu dipenuhi oleh sambutan daripada pengoptimuman proses fosforilasi	139
Jadual 4.6:	Keadaan optimum proses fosforilasi dikira daripada Design-Expert®	141

SENARAI RAJAH

Rajah 1.1:	Struktur molekul selulosa fosfat	2
Rajah 2.1:	Pokok kelapa sawit	5
Rajah 2.2:	Bunga kelapa sawit (a) bunga jantan (b) bunga betina dan (c) buah kelapa sawit	6
Rajah 2.3:	Carta pai bagi sumber biojisim daripada industri di Malaysia	9
Rajah 2.4:	Lambakan sisa EFB di kilang sawit	10
Rajah 2.5:	Struktur mudah sel kayu yang menunjukkan lamella tengah (LT), dinding primer (P), lapisan luar (S_1), lapisan tengah (S_2) dan lapisan dalam (S_3) dinding sekunder, dan lapisan bertuat (W).	17
Rajah 2.6:	Struktur kerusi selulosa. Unit-unit rantai β -D-glukopiranosida berkonformasi kerusi (4C_1)	18
Rajah 2.7:	Rangkaian selulosa (konformasi kerusi). Garisan putus-putus yang menyambungkan di antara gelang selulosa menunjukkan ikatan hidrogen inter dan intra molekul yang terbentuk	19
Rajah 2.8:	Skematik pembentukan kawasan berhablur dan amorfus rantai selulosa	20
Rajah 2.9:	Skematik bagi pembentukan selulosa mikrokristal	22
Rajah 2.10:	Struktur umum (a) selulosa dan (b) terbitan selulosa. Kumpulan berfungsi hidroksil ($-OH$) daripada selulosa ditukargantikan dengan kumpulan penukarganti ($-OR$) menghasilkan terbitan selulosa	23
Rajah 2.11:	Contoh polisakarida ester yang dihasilkan melalui tindak balas dengan kumpulan aktif hidroksil	24

Rajah 2.12:	Struktur reagen bagi tindak balas fosforilasi	42
Rajah 2.13:	Plot kontur bagi sambutan	47
Rajah 3.1:	Aliran keseluruhan perjalanan projek	50
Rajah 3.2:	Skematik penyusunan radas yang digunakan bagi proses fosforilasi.	60
Rajah 4.1:	Spektrum FT-IR bagi PT-OPEFB dan MCC-OPEFB	72
Rajah 4.2:	OPEFB dalam bentuk (a) PT (b) MCC	72
Rajah 4.3:	Mikrograf SEM bagi (a) PT-OPEFB dan (b) MCC-OPEFB	73
Rajah 4.4:	Termogram TGA bagi PT-OPEFB	74
Rajah 4.5:	Termogram TGA bagi MCC-OPEFB	74
Rajah 4.6:	Termogram DSC bagi PT-OPEFB	75
Rajah 4.7:	Termogram DSC bagi MCC-OPEFB	75
Rajah 4.8:	Spektrum FT-IR bagi PT-OPEFB dan MCC-OPEFB yang telah terfosforilasi	78
Rajah 4.9:	Spektrum FT-IR bagi MCC-OPEFB dan MCC-OPEFB yang telah terfosforilasi	79
Rajah 4.10:	Struktur molekul bagi kumpulan fosfat yang dihasilkan	80
Rajah 4.11:	Graf pentitratan potentiometri bagi CP-OPEFB dengan 0.1M NaOH. (Siri 1) keluk pentitratan potentiometri dan (Siri 2) terbitan pertama, mendapati satu keadaan pengoksidaan.	82
Rajah 4.12:	Spektrum EDX bagi CP-OPEFB	83
Rajah 4.13:	Bilangan atom bagi sampel MCC-OPEFB dan CP-OPEFB	84
Rajah 4.14:	CP/ MAS ^{31}P NMR spektrum pada keadaan pepejal bagi CP-OPEFB. 85 % H_3PO_4 digunakan sebagai rujukan piawai.	85

Rajah 4.15:	Spektra CP/MAS ^{13}C NMR dalam keadaan pepejal bagi (a) MCC-OPEFB (b) CP-OPEFB. TMS digunakan sebagai rujukan piawai	86
Rajah 4.16:	Termogram DSC bagi MCC-OPEFB dan CP-OPEFB	88
Rajah 4.17:	Mikrograf SEM bagi MCC-OPEFB dengan pembesaran (a) $\times 1000$ dan (b) $\times 10000$	90
Rajah 4.18:	Mikrograf SEM bagi CP-OPEFB dengan pembesaran (a) $\times 1000$ dan (b) $\times 10000$	90
Rajah 4.19:	Struktur molekul CP-OPEFB yang dijangkakan	92
Rajah 4.20:	Plot kebarangkalian normal reja bagi (a) kandungan fosforus (b) jumlah hasil (c) serapan air, dan (d) takat lebur	109
Rajah 4.21:	Plot Reja melawan nilai teramal bagi (a) kandungan fosforus (b) jumlah hasil (c) serapan air dan (d) takat lebur	111
Rajah 4.22:	Plot pengusikan bagi P	114
Rajah 4.23:	Graf interaksi antara (a) suhu dengan masa (b) suhu dengan $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{Et}_3\text{PO}_4$ dan (c) masa dengan $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{Et}_3\text{PO}_4$ bagi P	115
Rajah 4.24:	Graf permukaan 3D bagi P	117
Rajah 4.25:	Plot pengusikan bagi Y	119
Rajah 4.26:	Graf interaksi antara (a) suhu dengan masa (b) masa dengan $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{Et}_3\text{PO}_4$ dan (c) suhu dengan $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{Et}_3\text{PO}_4$ bagi jumlah hasil	121
Rajah 4.27:	Graf permukaan 3D bagi Y	122
Rajah 4.28:	Plot Pengusikan bagi S	126
Rajah 4.29:	Plot interaksi antara (a) suhu dengan masa (b) masa dengan $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{Et}_3\text{PO}_4$ dan (c) suhu dengan $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{Et}_3\text{PO}_4$ bagi S	126

Rajah 4.30:	Plot permukaan 3D bagi serapan	128
Rajah 4.31:	Plot pengusikan bagi takat lebur	130
Rajah 4.32:	Graf interaksi bagi takat lebur	130
Rajah 4.33:	Plot permukaan 3D bagi takat lebur	131

SENARAI SINGKATAN

CP	Selulosa fosfat
CP-OPEFB	Selulosa fosfat daripada tandan buah kelapa sawit kosong
DOE	Reka bentuk ujikaji
DS	Darjah penukargantian bagi selulosa
EFB	Tandan buah kelapa sawit kosong
Et ₃ PO ₄	Trietilfosfat
H ₃ PO ₄	Fosforik asid
MCC	Selulosa mikrokristal
MCC-OPEFB	Selulosa mikrokristal daripada tandan buah kelapa sawit kosong
od	Berat ketuhar
-OH	Kumpulan hidroksil
OPEFB	Tandan buah kelapa sawit kosong
P	Kandungan fosforus
P ₂ O ₅	Fosforus pentaoksida
-PO ₄	Kumpulan fosfat
PT	Pulpa terlarut
PT-OPEFB	Pulpa terlarut daripada tandan buah kelapa sawit kosong
RSM	Kadah permukaan sambutan
S	Serapan air
T _m	Takat lebur
Y	Jumlah hasil

ABSTRAK

Selulosa fosfat adalah salah satu biopolimer baru yang mempunyai potensi yang sangat besar sebagai biobahan. Secara kebiasaannya kayu digunakan sebagai bahan mentah selulosa, walau bagaimanapun selulosa juga boleh didapati dalam kuantiti yang besar daripada tumbuhan bukan kayu. Salah satu sumber alternatif yang menjanjikan kuantiti yang tinggi adalah gentian tandan buah kelapa sawit kosong (OPEFB), iaitu bahan sampingan daripada industri kelapa sawit. Dalam kajian ini, gel selulosa fosfat daripada OPEFB (CP-OPEFB) berjaya dihasilkan daripada selulosa mikrokristal daripada OPEFB (MCC-OPEFB) menggunakan kaedah $H_3PO_4/P_2O_5/Et_3PO_4$ /heksanol. Pencirian bagi CP-OPEFB menggunakan analisis EDX, FTIR, spektroskopi CP/MAS ^{13}C - dan ^{31}P -NMR telah membuktikan kejayaan proses fosforilasi. Melalui CP/MAS ^{13}C NMR, menunjukkan fosforilasi berlaku pada kedudukan C6 dalam moiety glukosa yang menyebabkan darjah penghablurannya berkurang sehingga 53 %. Kestabilan termal bagi MCC-OPEFB juga berkurang kesan tindak balas fosforilasi.

Kaedah permukaan sambutan (RSM) dengan model gubahan memusat digunakan untuk menentukan keadaan optimum bagi fosforilasi MCC-OPEFB. Faktor yang dikaji adalah suhu tindak balas, masa tindak balas dan nisbah H_3PO_4/Et_3PO_4 . Model kuadratik yang mengandungi empat pembolehubah tidak bersandar dikenal pasti dapat menerangkan proses fosforilasi bagi MCC-OPEFB dengan korilasi sambutan pembolehubah secara relatifnya mempunyai darjah R^2 yang baik. Data yang diperoleh daripada RSM mendapati keadaan optimum dengan nilai darjah penukar gentian (DS) 1.60 dan 49 peratus hasil diperoleh pada suhu 49 °C dengan masa tindak balas 3.13 hari dan nisbah H_3PO_4/Et_3PO_4 adalah 1.

Kata kunci: Selulosa fosfat, gentian tandan buah kelapa sawit kosong, selulosa mikrokristal, kaedah $H_3PO_4/P_2O_5/Et_3PO_4$ /heksanol, kaedah permukaan sambutan

ABSTRACT

PRODUCTION OF CELLULOSE PHOSPHATE FROM OIL PALM EMPTY FRUIT BUNCHES (OPEFB) AND OPTIMIZATION VIA RESPONSE SURFACE METHODOLOGY (RSM)

Cellulose phosphate is one of the new emerging biopolymers with tremendous potentials as biomaterials. Typical cellulosic raw materials used for derivatization are wood; nevertheless cellulose is also available in huge quantities from other non-woody plants, one such alternative promissory source being the oil palm empty fruit bunches fibers (OPEFB), a by-product of the oil palm industry. In this work, OPEFB cellulose phosphate (OPEFB-CP) gel was successfully synthesized from OPEFB cellulose microcrystal (OPEFB-MCC) using the $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{P}_2\text{O}_5/\text{Et}_3\text{PO}_4/\text{hexanol}$ procedure. Characterization of the OPEFB-CP which was performed using EDX analysis, FTIR, CP/MAS ^{13}C - and ^{31}P -NMR spectroscopic analyses provided clear evidence for successful phosphorylation. Through CP/MAS ^{13}C NMR, the OH group in the glucose residues was shown to have a preference at the C6 position resulting in a 53% reduction in crystallinity. Thermal stability of the OPEFB-MCC was found to decrease upon chemical modification.

Response surface methodology (RSM) with central composite design was used to determine the optimum conditions for phosphorylation of OPEFB-MCC; the factors investigated were reaction temperature, reaction period and $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{Et}_3\text{PO}_4$ ratio. Quadratic models consisting of the four independent variables were found to accurately describe the phosphorylation process with correlation between the actual and predicted values of the response variables having a relatively good degree of R^2 .

The optimum operating conditions with 1.60 degree of substitution (DS) and 49 percent yield are relatively obtained at 49 °C, 3.13 day reaction period and H₃PO₄/Et₃PO₄ ratio of 1.

Keywords: Cellulose phosphate, oil palm empty fruit bunches fibers, microcrystalline cellulose, H₃PO₄/P₂O₅/Et₃PO₄/hexanol procedure, response surface methodology

BAB 1: PENGENALAN

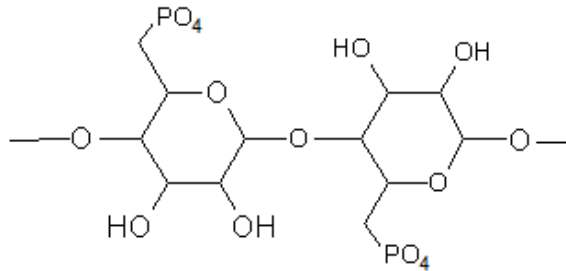
1.1 Latar belakang projek

Industri sawit yang telah berkembang hingga ke peringkat antarabangsa telah memberikan kekayaan yang tidak terhingga kepada negara. Walau bagaimanapun dalam masa yang sama industri ini telah dipersoal tentang kaedah bagi mengekalkan kelestarian alam sekitar. Dilema yang dihadapi oleh pengusaha adalah bagi mengatasi masalah sistem pengurusan biojisim. Terutamanya tandan buah kelapa sawit kosong (OPEFB) yang dihasilkan secara besar-besaran di kilang-kilang selain daripada hasil utama iaitu minyak sawit yang dikomersialkan.

Mencari sistem penyelenggaraan hasil sampingan kilang secara efektif telah memberi kesulitan kepada para pengusaha kilang kelapa sawit. Pelbagai kaedah telah dilakukan dan salah satu kaedah alternatif yang didapati berkesan adalah dengan memanfaatkan sisa biojisim kelapa sawit ini melalui menghasilkan produk hiliran. Pelbagai variasi produk telah dihasilkan daripada sisa biojisim kelapa sawit sama ada untuk digunakan sebagai sumber tenaga atau penghasilan produk baru. Inisiatif ini bukan sahaja mampu meminimumkan masalah pengurusan biojisim tetapi dalam masa yang sama dapat dijadikan sebagai sumber pendapatan alternatif kepada pengusaha. Sekali gus dapat meningkatkan lagi hasil yang diperolehi daripada sumber sawit.

Kajian yang dijalankan oleh Law *et al.*, (2007) mendapati selulosa adalah komposisi kimia utama yang terdapat dalam biojisim kelapa sawit. Oleh sebab itu sisa buangan kelapa sawit ini diyakini adalah bahan yang cukup sesuai untuk menjadi bahan alternatif bagi menggantikan sumber alam yang semakin kritikal

seperti kayu. Hal ini kerana sehingga kini kayu dan kapas adalah sumber utama bagi penghasilan selulosa.



Rajah 1.1: Struktur molekul selulosa fosfat

Pada keadaan asal penggunaan selulosa adalah agak terhad dan kurang fleksibel. Oleh sebab itu terbitan selulosa dihasilkan untuk meningkatkan aplikasi selulosa secara lebih spesifik. Dalam kajian ini selulosa fosfat (CP) adalah produk yang telah dipilih untuk dihasilkan. Selulosa fosfat (Rajah 1.1) mempunyai beberapa sifat yang istimewa dan berpotensi untuk digunakan secara meluas dalam industri. Sebagai contoh keupayaan selulosa fosfat untuk bertindak sebagai bahan penebat termal dengan menahan kepanasan pada tempoh masa dan suhu tertentu. Sifat ini biasanya digunakan dalam industri pembuatan kertas dan tekstil. Selulosa fosfat juga boleh bertindak sebagai bahan pertukaran ion yang biasa digunakan dalam proses penulenan, pemisahan dan dekontaminasi dalam larutan akueus.

Selain itu proses penghasilan selulosa fosfat juga dapat meningkatkan lagi aktiviti biologi selulosa untuk diaplikasi dalam bidang perubatan sebagai biobahan. Biobahan adalah bahan sintetik atau semulajadi, yang boleh berfungsi sebagai medium yang boleh menghubungkan sistem antara tisu hidup. Tujuan penggunaan biobahan adalah untuk meningkatkan kesihatan manusia dengan memperbaiki fungsi tisu hidup atau menggantikan organ dalam tubuh manusia yang rosak.

Cadangan yang diutarakan melalui kajian ini adalah untuk menghasilkan selulosa fosfat daripada OPEFB dan proses pencirian bagi selulosa fosfat yang dihasilkan. Kemudian pengoptimuman bagi proses penghasilan selulosa fosfat dilakukan melalui kaedah permukaan sambutan (RSM). RSM digunakan kerana proses penghasilan selulosa fosfat adalah tindak balas heterogen yang melibatkan beraneka pembolehubah. Dalam sistem beraneka pembolehubah, kesan terhadap satu pembolehubah tidak dapat ditentukan melainkan semua keadaan ditetapkan pada keadaan yang sama, iaitu satu pembolehubah diuji pada satu masa eksperimen. Kaedah ini mempunyai beberapa kekurangan terutamanya kesan tindak balas antara setiap pembolehubah tidak dapat ditentukan dan melibatkan bilangan eksperimen yang besar. Oleh sebab itu satu teknik yang sesuai bagi aplikasi ini adalah RSM. Kaedah ini adalah alternatif yang lebih baik untuk mengkaji proses beraneka pembolehubah secara lebih efektif dan ekonomik.

Secara umumnya walaupun diketahui selulosa fosfat mempunyai potensi yang besar dalam industri, kajian yang mendalam dan terperinci bagi proses penghasilan selulosa fosfat masih kurang dilakukan. Oleh sebab itu keputusan daripada kajian ini dipercayai dapat digunakan untuk memaksimumkan lagi aplikasi selulosa fosfat dalam industri tertentu. Inovasi melalui penghasilan selulosa fosfat daripada OPEFB ini juga akan menghasilkan satu lagi produk alternatif yang mempunyai nilai komersial yang tinggi dengan nilai yang lebih kompetatif dalam pasaran. Hal ini kerana penghasilan selulosa fosfat dalam kajian ini menggunakan biojisim daripada kelapa sawit sebagai bahan mentah bagi menggantikan sumber kayu yang semakin kritikal.

1.1 Objektif

Objektif utama dalam kajian ini adalah untuk menghasilkan selulosa fosfat dari tandan buah kelapa sawit kosong (OPEFB) dengan darjah penukargantian yang tinggi. Untuk mencapai tujuan ini beberapa skop kajian perlu dilakukan iaitu:

1. Mengenal pasti stok suapan yang sesuai bagi kaedah yang digunakan untuk penghasilan selulosa fosfat daripada tandan buah kelapa sawit kosong (CP-OPEFB).
2. Mencirikan CP-OPEFB yang dihasilkan.
3. Mengkaji kesan suhu, masa, dan nisbah H_3PO_4/Et_3PO_4 dalam tindak balas fosforilasi.
4. Mendapatkan kondisi yang optimum bagi menghasilkan CP-OPEFB dengan darjah penukargantian (DS) yang maksimum melalui kaedah statistik iaitu kaedah permukaan sambutan (RSM).

BAB 2: TINJAUAN LITERATUR

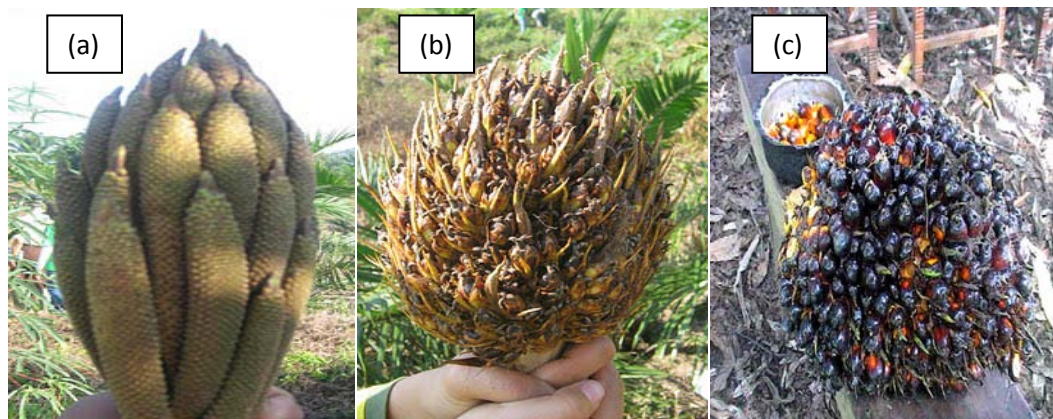
2.1 Kelapa Sawit

Kelapa sawit atau *Elaeis guineensis* Jacq. (Rajah 2.1) adalah tumbuhan jenis palma yang berasal dari Afrika Barat (Hartley, 1967). Tumbuhan ini mula diperkenalkan di Malaysia sebagai tanaman hiasan pada dekat ke 1910-an. Keadaan iklim yang panas dan lembap sepanjang tahun menjadikan Malaysia adalah kawasan yang sesuai untuk penanaman kelapa sawit. Hal ini kerana pokok kelapa sawit memerlukan kawasan penanaman di tempat yang terbuka dengan kelembapan yang tinggi iaitu curahan hujan sekitar 2,000 - 2,500 mm setahun.



Rajah 2.1: Pokok kelapa sawit

Pokok kelapa sawit mempunyai satu batang tunggal dengan daun majmuk dan tersusun lurus pada kedua-dua belah pelepah daun utama dan berbentuk seolah-olah pelepah bulu (Rajah 2.1). Kelapa sawit menghasilkan dua jenis bunga iaitu bunga jantan dan bunga betina. Bunganya akan tumbuh di setiap pelepah daun (FAO, 1977). Bunga jantan dan bunga betina secara kebiasaannya dihasilkan daripada tandan yang berbeza. Bunga jantan memiliki bentuk yang tirus dan panjang, sementara bunga betina kelihatan lebih besar dan mekar (Rajah 2.2 (a) dan (b)). Bunga dan buah kelapa sawit adalah dalam bentuk tandan yang bercabang banyak. Buah kelapa sawit dihasilkan daripada bunga betina, bersaiz kecil dan berwarna merah kehitaman apabila telah masak (Rajah 2.2 (c)). Buah sawit ini dapat menghasilkan minyak yang bermutu tinggi dan mempunyai permintaan yang tinggi. Oleh sebab itu kelapa sawit telah menjadi antara tanaman utama bagi tujuan pengkomersialan di Malaysia.



Rajah 2.2: Bunga kelapa sawit (a) bunga jantan, (b) bunga betina dan (c) buah kelapa sawit

2.1.1 Industri sawit di Malaysia

Penanaman kelapa sawit di Malaysia kini telah berkembang pesat dengan pembukaan ladang-ladang yang besar dan lebih terancang. Pencapaian Malaysia sebagai pengeksport utama dunia produk sawit bermula apabila Lembaga Kemajuan Tanah Persekutuan (FELDA) mengambil inisiatif untuk membuka tanah rancangan kelapa sawit secara besar-besaran pada dekat ke 1960-an. Hal ini berikutan pengeluaran getah sintetik dan menyebabkan kejatuhan harga getah yang ketika itu adalah hasil eksport utama negara.

Inovasi melalui teknologi moden telah memberikan pulangan yang lebih lumayan dalam industri sawit. Seiring dengan peningkatan pengeluaran minyak sawit, statistik daripada Lembaga Minyak Sawit Malaysia (MPOB) juga mendapati permintaan terhadap produk sawit terus meningkat setiap tahun (Jadual 2.1). Hal ini kerana minyak sawit mempunyai keseimbangan nutrient dengan kualiti minyak yang tinggi dan kepelbagaian produk yang telah dihasilkan untuk tujuan pengkomersialan (MPOC, 2006). Selain itu, industri sawit juga telah menawarkan lebih banyak peluang pekerjaan sebagai sumber pendapatan kepada lebih ramai rakyat Malaysia.

Permintaan yang semakin meningkat dan pasaran dunia yang meluas menyebabkan pihak kerajaan meyakini industri sawit mempunyai potensi yang tidak terbatas (MPOC, 2007). Oleh sebab itu pihak kerajaan telah memberi jaminan kepada para pengusaha kelapa sawit untuk memberi bantuan dan sokongan secara berterusan. Insentif yang telah ditawarkan dan galakan yang diberikan oleh pihak kerajaan memberikan keyakinan kepada para pengusaha untuk cenderung ke dalam industri kelapa sawit dan membolehkan Malaysia terus terkehadapan dalam industri ini.

Jadual 2.1: Eksport produk sawit tahunan: 2004 – 2008 (Tan)

Tahun	Minyak sawit mentah	Minyak sawit telah diproses	Minyak sawit
2004	1,324,479	11,257,313	12,581,792
2005	1,611,621	11,833,890	13,445,511
2006	2,376,542	12,046,626	14,423,168
2007	1,935,927	11,810,895	13,746,823
2008	2,336,577	13,075,935	15,412,512
Peningkatan pada tahun 2008	400,650	1,265,040	1,665,689

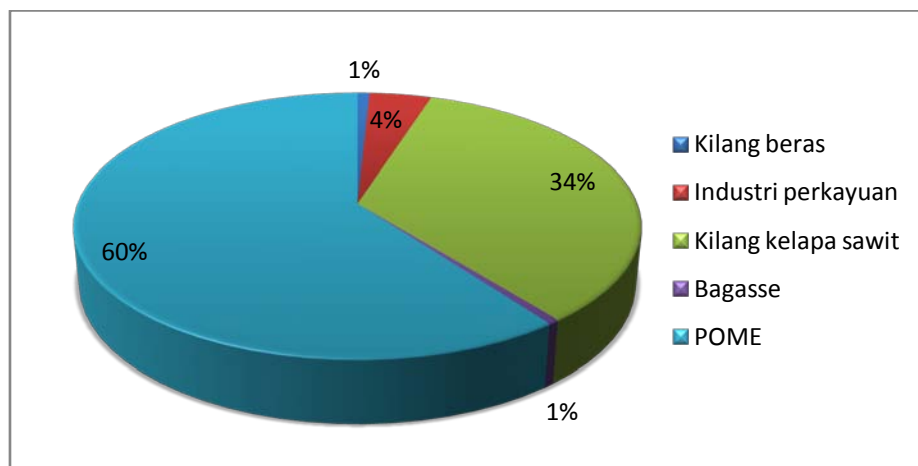
Sumber: MPOB, 2008

Implikasinya pembukaan ladang kelapa sawit yang mapan dan secara besar-besaran terus dilakukan. Sehingga tahun 2008 kawasan penanaman kelapa sawit di Malaysia sahaja telah menghampiri 4.5 juta hektar termasuk Sabah dan Sarawak (MPOB, 2008). Kini industri minyak sawit telah menjadi sumber pendapatan penting kepada negara. Penghasilan minyak sawit mentah di Malaysia sahaja telah melebihi 17 juta tan setahun dan telah dieksport ke lebih 150 buah negara dengan China sebagai negara utama pengimport hasil sawit Malaysia (MPOC, 2007).

2.1.2 Krisis kelestarian alam sekitar daripada industri sawit

Kejayaan yang diperoleh daripada industri ini bukan sahaja menunjukkan Malaysia mampu bersaing di peringkat antarabangsa dalam bidang pengeluaran tetapi juga telah memberi manfaat kepada seluruh rakyat. Kepentingan industri ini memang tidak boleh disangkal lagi. Walau bagaimanapun dalam masa yang sama

industri ini dipersoal tentang kaedah bagi mengekalkan kelestarian alam sekitar. Dilema yang dihadapi adalah bagi mengatasi masalah sistem pengurusan biojisim yang dihasilkan secara sampingan di kilang-kilang selain daripada hasil utama yang dikomersialkan.



Rajah 2.3: Carta pai bagi sumber biojisim daripada industri di Malaysia (Yokoyama dan Matsumuya, 2008)

Kilang sawit menghasilkan biojisim sebagai sisa buangan dalam kuantiti yang sangat banyak dan terbesar di Malaysia (Rajah 2.3). Sisa buangan ini dihasilkan dalam bentuk tandan buah kelapa sawit kosong, gentian-gentian buah, kulit, batang, pelepah dan efluen dari kilang kelapa sawit (POME). Statistik MPOB menunjukkan Malaysia mengeluarkan buah kelapa sawit sebanyak 18.55 tan/hektar bagi tahun 2008 (MPOB, 2008). Manakala hampir 22 % daripada jisim buah sawit yang diproses akan menjadi tandan buah kelapa sawit kosong (EFB) (Lim dan Zaharah, 2000). Oleh sebab itu dianggarkan sekurang-kurangnya sebanyak 4 tan/hektar berat kering EFB akan dihasilkan setiap tahun.



Rajah 2.4: Lambakan sisa EFB di kilang sawit

Kaedah yang telah digunakan bagi mengatasi masalah lambakan sisa biojisim adalah dengan menjadikan biojisim sebagai sungkupan atau dibiarkan reput di ladang untuk dijadikan baja. Tetapi kaedah ini adalah genting, tidak mungkin semua biojisim dapat dijadikan sungkupan di ladang dalam tempoh yang sama. Hal ini kerana biojisim terjana setiap hari dalam kuantiti yang terlalu banyak dan proses penguraiannya pula adalah dalam kadar yang perlahan. Tambahan pula jika kaedah ini dijadikan sebagai alternatif utama, kilang-kilang yang tidak mempunyai ladang kelapa sawit akan menghadapi masalah bagi melupuskan biojisim melalui kaedah ini. Satu lagi kaedah alternatif adalah melalui pembakaran tanpa melibatkan pencemaran (Hayati *et al.*, 2007). Kaedah ini dapat membantu mengurangkan kesan pencemaran dan pengurusan biojisim, walau bagaimanapun memerlukan kos operasi yang tinggi.

Masalah lambakan sisa biojisim kelapa sawit ini memerlukan suatu kaedah pengurusan alternatif yang lebih sistematik dan efisien. Oleh sebab itu keputusan

yang tepat dan bermanfaat perlu diambil daripada bahan buangan biojisim ini. Kaedah yang diketengahkan memerlukan prinsip yang dapat mengekalkan kelestarian alam semulajadi dan dalam masa yang sama pemanfaatan secara ekonomi dapat dikecapi. Hal ini bertujuan pembangunan yang lebih berterusan dapat dicapai.

2.1.3 Biojisim sebagai sumber alternatif bagi bahan mentah

Persoalan bagi pengurusan sisa biojisim ini telah memberi inisiatif kepada para penyelidik untuk memanfaatkan sisa biojisim ini melalui program kitar semula. Kaedah yang dicadangkan adalah melalui penghasilan produk hiliran daripada biojisim. Alternatif untuk menghasilkan produk hiliran ini nyata efektif untuk mengurangkan masalah tersebut dan dalam masa yang sama dapat meningkatkan lagi budaya penyelidikan. Hal ini bagi memastikan produk yang dihasilkan bermanfaat dan berkualiti tinggi untuk dihasilkan. Inisiatif yang dilakukan telah mendapat sokongan kerajaan dan badan-badan swasta. Kenyataan ini dibuktikan melalui insentif dalam bentuk kewangan yang terus disalurkan dan persidangan yang dilakukan bagi membincangkan tentang isu ini daripada pelbagai pihak.

Krisis kekurangan tenaga yang berlaku kerana penyusutan sumber bahan mentah fosil seperti petroleum, gas asli dan arang batu telah memberikan kesan yang negatif dan telah menjadi kekangan yang besar bagi pembangunan dalam kebanyakan industri. Walaupun krisis penyusutan sumber fosil mula melanda pada dekat ke 1970-an, tetapi sehingga kini kebergantungan terhadap sumber ini untuk menghasilkan tenaga masih lagi tinggi. Krisis ini akan terus dirasai selagi sumber ini

masih digunakan sebagai bahan mentah utama bagi penghasilan tenaga. Kajian juga mendapati kerana kadar penggunaan sumber bahan mentah fosil yang terlalu tinggi menyebabkan sumber fosil ini tidak akan berterusan dalam jangka masa yang lebih panjang. Oleh sebab itu pembangunan sumber tenaga alternatif baru yang boleh diperbaharui adalah diperlukan dan akan menjadi pendekatan yang paling bagus.

Satu lagi masalah yang dihadapi oleh dunia masa kini adalah pemanasan global. Sehingga kini tumbuhan daripada jenis kayu adalah sumber bahan mentah terbesar dalam kebanyakan industri terutamanya dalam sektor pembuatan perabot serta penghasilan pulpa dan kertas. Merujuk kepada situasi ini sumber alternatif baru bagi menggantikan bahan mentah kayu diperlukan. Hal ini kerana penggunaan kayu secara meluas dan berterusan akan merosakkan hutan dan mengganggu ekosistemnya. Ekoran daripada krisis ini penyusutan pengeluaran produk hasil hutan telah melanda di kebanyakan negara pengeluar hasil hutan utama dunia termasuk Eropah, Amerika Utara, dan Asia (Hynninen, 1998).

Menyedari masalah yang bakal dihadapi dalam jangka masa yang lebih panjang jika aktiviti pembalakan hutan tanpa kawalan terus dijalankan, Jabatan Perhutanan Malaysia telah menubuhkan hutan simpan dara untuk melindungi dan mengekalkan hutan dalam keadaan semulajadi. Penebangan pokok-pokok yang belum mencapai tempoh matang juga tidak dibenarkan. Walau bagaimanapun kaedah ini menyebabkan kos pengeluaran daripada sumber kayu terus meningkat. Hal ini kerana permintaan yang tinggi tetapi sumber yang ditawarkan adalah terhad.

Merujuk kepada kedua-dua masalah yang dihadapi sisa buangan biojisim telah ditemui sebagai bahan mentah yang paling sesuai digunakan sebagai alternatif bagi menggantikan sumber alam yang semakin kritikal iaitu bahan mentah yang

berasaskan kayu dan bahan api fosil. Melalui kaedah ini masalah lambakan sisa buangan biojisim dapat dikurangkan dan dalam masa yang sama bahan yang amat diperlukan tetapi telah berkurangan dapat dihasilkan. Kaedah ini dipercayai bukan sahaja dapat memberikan jaminan ekonomi tetapi juga dapat menjimatkan sumber fosil dan menjaga kelestarian alam untuk meneruskan kemajuan dan kesejahteraan generasi akan datang.

Jadual 2.2: Biojisim yang diperoleh daripada pelbagai sumber

Sumber	Bahan buangan dalam bentuk biojisim
Agrikultur	Jerami, daun dan dahan daripada pokok-pokok, kulit kacang dan badam, sekam padi dan gandum, tongkol jagung, dan lain-lain.
Pemprosesan makanan	Kulit buah-buahan, pulpa, gilingan kopi, potongan sayur-sayuran, dan lain-lain.
Pemprosesan kayu dan kertas	Semak dan lalang, kulit kayu, abu kayu, perkemasan dari kilang kertas dan lain-lain
Perbandaran	40-60% daripada bahan buangan pepejal adalah sampah dan kertas buangan.

Sumber: Reese *et al.*, 1972

Aplikasi sisa biojisim sebagai sumber alternatif bagi menggantikan sumber-sumber alam yang semakin kritikal adalah suatu idea yang bernas dan akan memberikan kelebihan yang besar dalam industri. Hal ini kerana biojisim adalah sumber asas yang boleh diperbaharui dan boleh didapati dalam kuantiti yang sangat banyak daripada pelbagai sumber (Jadual 2.2). Oleh sebab itu bekalan bahan mentah secara berterusan dan relatifnya murah juga dapat dipastikan.

Biojisim didapati sesuai untuk dijadikan sebagai bahan alternatif bagi sumber fosil. Hal ini kerana biojisim mempunyai unsur-unsur asas yang sama dengan sumber fosil ini iaitu karbon (C), hidrogen (H), dan oksigen (O). Oleh sebab itu biojisim juga dapat digunakan untuk menghasilkan tenaga dan bahan yang sangat bermanfaat kepada semua. Sebagai contoh melalui proses penghidrogenan dan pirolisis. Kaedah ini dapat menukarkan biojisim kepada minyak dan arang sebagai sumber tenaga (Reese *et al.*, 1972; Yokoyama dan Matsumuya, 2008). Melalui proses fermentasi ke atas biojisim pula produk kimia organik bernilai tinggi dan berkualiti dapat dihasilkan (Detroy, 1981). Contohnya etanol, aseton, asid asetik, asid laktik dan sebagainya.

2.1.4 Aplikasi biojisim kelapa sawit hasilkan produk hiliran

Melalui tinjauan awal yang telah dilakukan dipercayai inovasi untuk menghasilkan produk hiliran daripada sisa biojisim khususnya EFB adalah satu kaedah yang menguntungkan. Usaha ini bukan lagi baru tetapi telah dipelopori oleh beberapa penyelidik di Malaysia. Penghasilan produk hiliran daripada biojisim sebagai bahan mentah telah semakin mendapat perhatian. Kini pelbagai variasi produk telah berjaya dihasilkan daripada biojisim seperti pembungkus makanan, pulpa, baja dan papan gentian berketumpatan sederhana bagi tujuan penghasilan tenaga pula seperti etanol, biometana dan biodiesel (Yokoyama dan Matsumuya, 2008).

Di Pusat Pengajian Teknologi Industri, Universiti Sains Malaysia, aplikasi pembuatan pulpa dan kertas daripada EFB adalah pelopor terhadap inisiatif ini. Law *et al.* (2007) telah membuat kajian ke atas beberapa gentian yang diperoleh daripada kelapa sawit. Keputusan mendapati pulpa terlarut yang dihasilkan daripada gentian

kelapa sawit termasuk EFB sesuai dijadikan sebagai bahan mentah untuk menghasilkan pelbagai gred kertas.

Walaupun aplikasi yang dinyatakan sebelum ini memerlukan beberapa kaedah awal sebelum EFB dapat dihasilkan sebagai produk, terdapat juga produk yang boleh dihasilkan terus daripada EFB tanpa melalui proses kimia atau biologi dengan hanya menukarkannya dalam bentuk gentian. Sebagai contoh pengisi tilam dan kusyen, alas kaki dan perkakasan automobil. Produk yang mengaplikasikan EFB dalam proses pembuatan kini telah berjaya dikomersialkan dan dieksport ke luar negara. Contohnya komponen kereta yang dikeluarkan oleh Proton dan Hyundai yang dihasilkan di Malaysia. Melihat kepada usaha yang giat dijalankan kini dipercayai dalam tempoh beberapa dekat lagi biojisim akan menjadi sumber alternatif yang penting dalam kebanyakan industri.

Penyelidikan dan kajian yang berterusan telah meningkatkan kepelbagaian aplikasi biojisim sebagai salah satu sumber alternatif. Produk yang dihasilkan kini tidak hanya tertumpu kepada bahan yang berunsurkan sumber tenaga dan alternatif bagi kayu semata-mata. Pelbagai variasi bahan kimia yang bermutu tinggi juga berpotensi dihasilkan dan proses yang terlibat tidak hanya dilakukan melalui proses fermentasi.

Potensi penghasilan bahan kimia yang bermutu tinggi daripada biojisim telah semakin mendapat perhatian yang sangat meluas. Hal ini tidak terkecuali bagi biojisim daripada sisa kelapa sawit. Berdasarkan Jadual 2.3 didapati kandungan holoselulosa di dalam EFB adalah paling tinggi yang merangkumi kandungan selulosa dan hemiselulosa. Hal ini menunjukkan bahawa EFB mempunyai komponen karbohidrat yang lebih banyak berbanding dengan bahan-bahan ekstraktif.

Berdasarkan kepada komposisi kimia yang ditunjukkan di dalam Jadual 2.3 nyatalah EFB mempunyai kandungan selulosa, hemiselulosa dan lignin yang tinggi. Hal ini secara langsung telah menunjukkan bahawa sisa buangan kelapa sawit mempunyai potensi yang amat luas dalam industri yang berasaskan bahan-bahan berselulosa dan dapat digunakan dalam pelbagai industri.

Sebagai contoh salah satu produk yang telah berjaya dihasilkan daripada EFB yang berasaskan selulosa adalah Palmcell® iaitu karboksilmetil selulosa (CMC) (WanRosli *et al.*, 1998). Bahan ini berpotensi untuk digunakan dalam proses pembuatan kertas dan boleh berfungsi sebagai bahan tambah untuk meningkatkan kekuatan kertas. Hasilnya kekuatan kertas yang dihasilkan meningkat dalam keadaan kering dan basah. Secara relatifnya produk ini bukan sahaja berkesan untuk meningkatkan kekuatan kertas tetapi kos penghasilan Palmcell® ini juga relatifnya lebih rendah berbanding dengan bahan tambah yang lain. Hal ini kerana menggunakan bahan buangan biojisim sebagai bahan utama dalam proses pembuatannya.

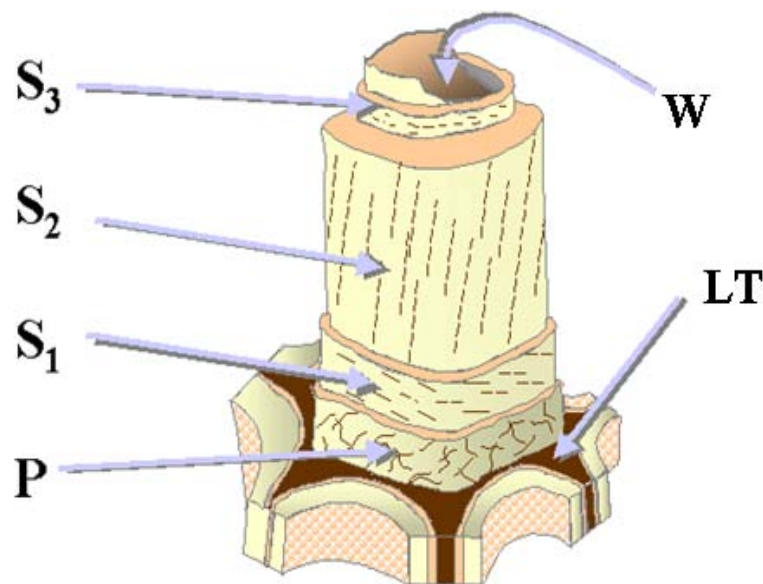
Jadual 2.3: Komposisi kimia buah kelapa sawit kosong (EFB)

Komposisi	% daripada berat kering EFB
Holosekulosa	78.4
Lignin bebas abu (tidak larut asid)	16.9
Ekstraktif	3.5
Abu	1.2

Sumber: Law *et al.* (2007) (setelah dinormalkan)

2.2 Selulosa

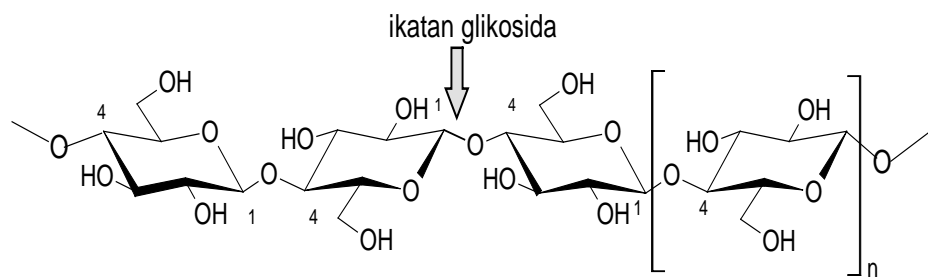
Selulosa adalah produk yang boleh didapati secara semulajadi dalam kuantiti yang sangat banyak, boleh diperbaharui dan terbiodegradasi. Selulosa juga adalah komponen utama yang terdapat di dalam dinding sel tumbuhan. Di dalam tumbuhan jenis kayu selulosa boleh diperoleh sebanyak 42-52 % dengan jisim molekul sehingga 2,000,000 dan kebanyakannya terletak di dalam dinding sel sekunder (Rajah 2.5) (Hergert, 1998). Manakala lebih 90 % selulosa boleh diperoleh daripada kapas mentah dan lebih 70 % boleh diperoleh daripada gentian basta (bast fiber) seperti rami, hem dan flaks (Kamide, 2005; Nissan *et al.*, 1965). Industri yang melibatkan selulosa adalah sangat luas. Manakala industri pulpa dan kertas adalah industri terbesar yang memanfaatkan selulosa sebagai bahan mentah utama dalam proses pembuatannya.



Rajah 2.5: Struktur mudah sel kayu yang menunjukkan lamella tengah (LT), dinding primer (P), lapisan luar (S₁), lapisan tengah (S₂) dan lapisan dalam (S₃) dinding sekunder, dan lapisan bertaut (W).

2.2.1 Kimia selulosa

Selulosa merupakan komponen karbohidrat yang mengandung unsur karbon (C), hidrogen (H) dan oksigen (O). Formula struktur bagi selulosa telah diperoleh pada pertengahan dekat ke 1930-an sebagai poli-(1→4)-β-D-glukopiranososa (Kamide, 2005; Sjöström, 1993). Selulosa adalah polimer linear yang tersusun atas unit ulangan D-glukopiranososa (Rajah 2.2). Unit-unit ini digabungkan melalui ikatan β (1→4) glikosida oleh atom oksigen pada karbon 1 dan karbon 4 di antara dua unit ulangan glukopiranososa yang bersebelahan.



Rajah 2.6: Struktur kerusi selulosa. Unit-unit rantai β-D-glukopiranososa berkonformasi kerusi (4C_1)

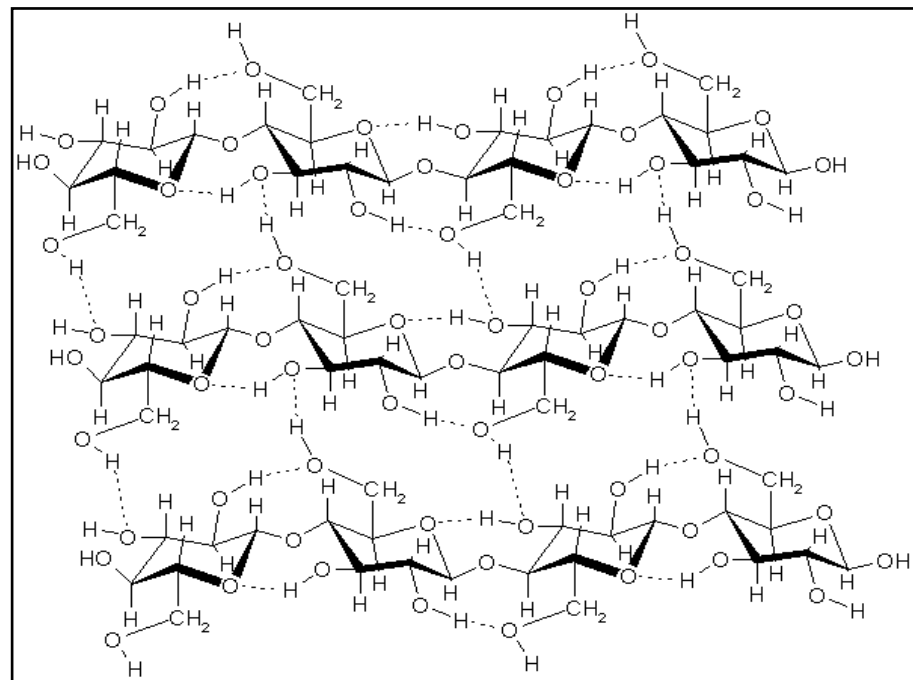
Formula empirik bagi selulosa adalah $(C_6H_{10}O_5)_n$ dengan n adalah unit ulangan bagi selulosa (Rajah 2.6) dan dikenali sebagai darjah pempolimeran (DP). Pada pertengahan 1930-an iaitu pada peringkat awal penemuan, DP bagi selulosa dianggap dalam julat 1 000 – 2 000. Kini DP bagi selulosa telah ditemui bernilai 5 000 dan dalam beberapa spesis sehingga 10 000 atau lebih (Nissan et al., 1965). Perbezaan nilai DP bagi selulosa adalah bergantung kepada sumber yang diperoleh dan proses yang telah dijalani. Aplikasi bagi selulosa kebanyakannya bergantung

kepada nilai DP yang dimilikinya. Jadual 2.4 menunjukkan perbezaan ciri-ciri selulosa melalui sumber, berat molekul dan darjah pempolimerannya.

Jadual 2.4: Berat molekul dan darjah pempolimeran bagi selulosa berdasarkan sumber

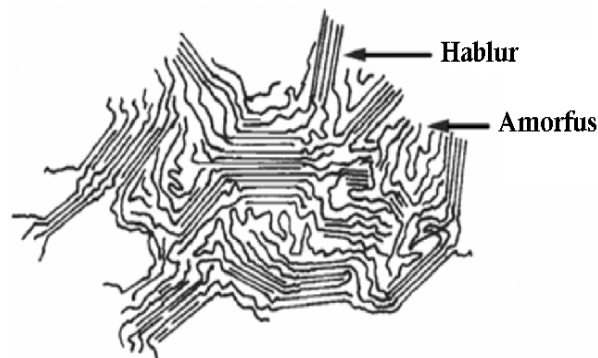
Sumber	Berat molekul	Darjah pempolimeran
Selulosa mentah	600 000 - 1 500 000	3 500 - 10 000
Kapas telah diproses	80 000 - 500 000	500 - 3 000
Pulpa kayu	80 000 - 340 000	500 - 2 100
Filamen rayon	57 000 - 73 000	350 - 450

Sumber: Figini, 1965; Nissan *et al.*, 1965



Rajah 2.7: Rangkaian selulosa (konformasi kerusi). Garisan putus-putus yang menyambungkan di antara gelang selulosa menunjukkan ikatan hidrogen inter dan intra molekul yang terbentuk.

Selulosa adalah makromolekul berantai panjang dan lurus sepenuhnya. Molekul selulosa ini berinteraksi antara satu sama lain melalui ikatan hidrogen inter dan intra molekul (Rajah 2.7). Ikatan hidrogen intramolekul membuat unit-unit glukopiranosida mempunyai gerakan yang terhad di sekitar ikatan acetal (glikosida). Padahal ikatan (\rightarrow 4) - β ini memerlukan putaran 180° bagi setiap unit glukosa untuk memenuhi konfigurasi β yang disambungkan oleh ikatan hemiacetal. Oleh sebab itu molekul selulosa mempunyai rantai molekul linear yang kaku dan rigid seperti rod (Nissan *et al.*, 1965).



Rajah 2.8: Skematik pembentukan kawasan berhablur dan amorfus rantai selulosa

Hasil susunan rantai selulosa ini membolehkannya berada rapat di antara satu sama lain dan membentuk bahagian struktur berhablur dan amorfus (Rajah 2.8). Hasil struktur berhablur bagi selulosa menyebabkannya mempunyai kekuatan tensil yang tinggi dan tidak larut dalam kebanyakan pelarut kecuali dalam pelarut yang mempunyai ikatan hidrogen yang agresif seperti N-metil morpoline-N-oksida. Sebaliknya bahagian yang relatifnya lebih bersifat amorfus mudah dipengaruhi oleh tindak balas hidrolisis dalam keadaan asid yang terkawal. Modifikasi terhadap selulosa dari segi struktur kimia, sifat penghabluran, penghasilan terbitan selulosa